

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

ФИЛОСОФИЯ И НАУКА

Физика и философия

А. Б. МИГДАЛ

ВСТУПЛЕНИЕ (5). ИНСТРУМЕНТЫ ПОЗНАНИЯ (7). Красота как эвристический Математика как инструмент познания. Принцип наблюдаемости. Дополнительность причинности. ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ И ТЕОРИЯ ТЯГОВЕНОСТИ. Относительность одновременности. Лоренц, Пуанкаре и СТО. Теория тяготения современная физика. КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ (15). Принцип дополнительности. Основы квантовой теории. Эйнштейн и Бор. Нужно ли искать другую интерпретацию КВАНТОВАНИЕ ПОЛЕЙ (20). Квантовая электродинамика. Квантование гравитационного свойства вакуума. Бесконечности, духи, та-хионы. ПОИСКИ ЕДИНСТВА (24). Объединения. Теория Всего. “Безумные” идеи. Конец физики? ЗАКЛЮЧЕНИЕ (29).

Вступление

“Эй вы, Бога нет!” — начал Остап Бендер свой диспут с ксендзами. Исполняя полемический прием, чтобы начать философский спор: “Точным наукам философия не нужна” (Имеется в виду непосредственное воздействие философии на процесс исследования, а не о влиянии ее на формирование личности ученого не обсуждается.)

Помогает ли научной работе наших физиков, математиков, биологов философия в вузе? Нужно ли включать в кандидатский минимум экзамен по философии?

Неквалифицированные идеологические работники считают этот предмет предметом политического воспитания, а экзамен по философии — проверкой политической лояльности. Это относится и к политической экономии, и к другим “идеологическим” предметам. Всем ясно, что идеологические заклинания не действуют. У думающих людей предвзятость к философии в существующей форме вызывает такое же отвращение, как у детей насилия.

Вопросы

философии №1 стр.5-32

ФИЛОСОФИЯ

И НАУКА

Физика и

философия

А. Б.

МИГДАЛ

ВСТУПЛЕНИЕ (5). ИНСТРУМЕНТЫ

ПОЗНАНИЯ (7). Красота как эвристический принцип. Математика как инструмент познания. Принцип наблюдаемости. Дополнительность. Принцип причинности. ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ И ТЕОРИЯ ТЯГОТЕНИЯ (12). Относительность одновременности. Лоренц, Пуанкаре и СТО. Теория тяготения и современная физика. КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ (15). Принцип дополнительности. Особенности квантовой теории. Эйнштейн и Бор. Нужно ли искать другую

интерпретацию? КВАНТОВАНИЕ
ПОЛЕЙ (20). Квантовая
электродинамика. Квантование
гравитации и свойства вакуума.
Бесконечности, духи, та-хионы.
ПОИСКИ ЕДИНСТВА (24). Начало
объединения. Теория Всего.
“Безумные” идеи. Конец физики?
ЗАКЛЮЧЕНИЕ (29).

Вступление

“Эй вы, Бога нет!”—начал Остап Бендер свой диспут с ксендзами. Используем этот полемический прием, чтобы начать философский спор: “Точным наукам философия не нужна!” (Имеется в виду непосредственное воздействие философии на процесс исследований. Вопрос о влиянии ее на формирование личности ученого не обсуждается.)

Помогает ли научной работе наших физиков, математиков, биологов изучение философии в вузе? Нужно ли включать в кандидатский минимум экзамен по философии?

Неквалифицированные идеологические работники считают этот предмет формой политического воспитания, а экзамен по философии — проверкой политической лояльности. Это относится и к

политической экономии, и к другим
“идеологическим” предметам.

Сейчас всем ясно, что
идеологические заклинания не
действуют. У думающих людей
преподавание философии в
существующей форме вызывает такое
же отвращение, как у детей
насильственное кормление. Я не
говорю уже об унижительной
процедуре кандидатского экзамена,
когда серьезный специалист
попадает в зависимость от казуиста
и начетчика, который вправе

поставить плохую отметку за
глубокое суждение. Сколько
талантливых людей отказались от
защиты из-за неспособности заучить
бесполезные догмы...

Невиданный взрыв научной
информации за последние
десятилетия привел к тому, что
“естественная философия” стала
слишком широкой для конкретного и
конструктивного исследования
методов познания. Этим должны
заниматься физики, биологи,

психологи, другие специалисты, творчески работающие в своей области,— сами или совместно с историками соответствующей науки.

Серьезная научная работа невозможна без философии, но философии “конкретной” или “прикладной”. Я понимаю под прикладной философией не нечто, стоящее “над” наукой, а качественную сторону исследований, помогающую наметить очертания предполагаемого решения и в конце

работы осмыслить полученные результаты и дать им правильную интерпретацию.

Прикладная философия — это организованная, то есть осознанная и систематизированная форма научной интуиции, возникшая на основа сопоставления различных методов решения многих конкретных задач и на детальном и глубоком анализе всего, что относится к объекту исследования. Она определяет оптимальное

направление развития, стратегию и тактику научной работы.

Особенность прикладной философии состоит в том, что после завершения исследований философская проблема снимается, точнее, переходит из научной области в учебную. Так было с парадоксом волн-корпускул, После создания квантовой электродинамики, когда стало ясно, что квант света представляет собой порцию возбуждения

электромагнитной волны, философская проблема исчезла. Так происходит во всех случаях, когда мы можем ответить на любой вопрос, поставленный экспериментом. В этом одна из причин некоторого пренебрежения философской стороной физики, распространенного среди молодых теоретиков. Кроме того, можно с успехом заниматься теоретической физикой без всякой философии, ограничиваясь разработкой следствий из уже существующих

теорий. Такие работы привлекают своей “достоверностью” и “надежностью” и граничат с прикладной математикой. В них не содержится существенных предположений, требующих проверки, но именно поэтому они редко приводят к рождению новых идей.

Многие задачи квантовой механики были решены физиками, которых не интересовала логическая структура квантовой теории. Но,

например, чтобы открыть новую форму квантовой механики в виде интеграла по всем классическим траекториям, понадобилось более глубокое понимание квантовой теории, философия физики.

Философия “вообще” не имеет непосредственного прикладного значения, по, как и поэзия, составляет часть духовного богатства человечества.

Здесь нет умаления философии. Это же замечание относится и к математике, и к фундаментальной физике, к любой фундаментальной науке. Так, главная задача фундаментальной физики в отличие от физики конкретной — не вычисление эффектов, а открытие принципов и создание концепций, лежащих в основе нашего понимания законов природы. *Она* выясняет свойства геометрии нашего мира, свойства симметрии элементарных

частиц, исследует возможность построения единой теории всех сил природы, проверяет справедливость таких общих законов, как причинность. Все эти проблемы не имеют проекции на мир повседневной жизни. Вместе с тем практическая роль фундаментальной науки, скрытая от поверхностного взгляда, состоит в том, что обнаруженные ею законы и методы исследования оплодотворяют конкретную физику, которая питает физику прикладную,

непосредственно влияющую на нашу жизнь. Такой путь — от фундаментальной науки через конкретную, прикладную и техническую физику — человечество должно проделать, чтобы освоить термоядерную энергию, которая избавит нас от страха перед ядерными реакторами и решит энергетическую проблему.

Но, быть может, не меньшая роль фундаментальной науки состоит в том, что она удовлетворяет

наши духовные и эстетические потребности так же, как музыка или поэзия.

Вернемся к философии. Сравнение с поэзией можно продолжить. Общую философию я воспринимаю как поэзию мысли, свободный стих, где строки скреплены не образами и музыкой, а логикой. И хотя все главные общепhilософские проблемы уже много раз обсуждались, форма их воплощения, подобно поэзии и

любви, может быть новой и неожиданной (у Гейне: “...es ist eine alte Geschichte, doch bleibt sei immer neu...) .

В статье я ограничусь *обсуждением* философии физики, близкой к моей профессии физика-теоретика. Перед вами отнюдь не философская работа, а, скорее, повод для философских размышлений и споров.

Моя цель — привлечь внимание естественников, историков науки и философов к разработке прикладной философии. Но прикладная философия требует глубокого проникновения в детали. Чтобы расширить аудиторию, придется многое пересказать и упростить, выделяя то, что мне кажется главным. В последних разделах, где речь идет о поисках единой физической теории, я ограничиваюсь упрощенным описанием основных

идей. Впрочем, упрощение — единственный путь к более глубокому пониманию на всех уровнях. Читателей, которых не удовлетворит такое схематичное изложение современной физики и ее трудностей, отсылаю к книге Л. Б. Окуня “Физика элементарных частиц” и к более специальному сборнику “Superstrings. A Theory of Everything” (Cambridge Univ. Pr.), посвященному новым попыткам создать единую теорию всех известных полей, где содержится

оценка этого направления
выдающимися физиками мира.

Начну с обсуждения нескольких
общих эвристических принципов и
затем на примерах физики XX в.
постараюсь показать необходимость
философского осмысления физики,
особенно в критические периоды ее
развития. В заключении я обсуждаю
вопросы, поставленные в начале
статьи, и следствия, к которым
приводят попытки подчинить науку
идеологии и политике.

Инструменты познания

В XX в. в естественных науках были развиты и проверены на опыте принципы, позволяющие избегать определенных ошибок и быстрее приходить к цели. Некоторые из них пришли в физику из общей теории познания, но настолько преобразовались, наполнившись конкретным содержанием, что о них стоит сказать заново.

Красота как эвристический принцип

Важнейшее эвристическое понятие в физике, как, впрочем, и в других науках,— красота теории, закона, концепции. Несмотря на кажущуюся субъективность этого понятия, оно редко вызывает разногласия в оценках. Под красотой теории понимается установление неожиданных связей между разнородными явлениями, богатство

и значительность заключений при минимальном числе правдоподобных предположений.) остроумие аргументации... Красивый математический прием или изящное рассуждение почти всегда либо помогают решить поставленную задачу, либо найдут применение при решении будущих задач. Красивые теории, как правило, плодотворны. Как утверждают авиаконструкторы, красивый самолет лучше летает...

Одно из проявлений красоты в физике — симметрия законов природы. Под симметрией понимается неизменность явлений и описывающих их уравнений при каких-либо преобразованиях. Например, неизменность уравнений при переходе к движущейся системе координат или при изменении знака времени. Требование симметрии позволяет открывать законы природы. Так, уравнения тяготения Эйнштейна почти однозначно

вытекают из требования симметрии относительно локальных преобразований координат в четырехмерном пространстве-времени. Идея симметрии пронизывает всю современную физику от теории элементарных частиц до теории металлов. Симметрия тесно связана с законами сохранения. Так, в электродинамике требование инвариантности уравнений относительно калибровочных преобразований приводит к закону сохранения заряда.

Законы сохранения, например закон сохранения энергии или импульса, вытекают из требования инвариантности физических уравнений относительно сдвига во времени и в пространстве (трансляционная симметрия). Мы полагаем, и это до сих пор подтверждалось опытом, что частицы или поля, имеющиеся в природе, “вложены” в совершенно симметричное пространство-время. Поэтому в пустом пространстве покоящееся тело не может

сдвинуться или повернуться. Законы сохранения — энергии, импульса и углового момента — универсальны именно потому, что они являются следствием общего свойства нашего мира — однородности и изотропности пространства-времени.

Объекты природы могут не иметь той симметрии, которая есть у законов. В природе встречаются зеркально асимметричные системы (например, двойная спираль), хотя

законы, определяющие их устройство, не изменяются при зеркальном отражении. Подобное “спонтанное нарушение симметрии” чрезвычайно распространено в природе. Капля воды на столе есть спонтанное нарушение трансляционной симметрии; этой симметрии соответствует равномерно размазанная по столу жидкость.

Изначальная симметрия в природе, как правило, нарушается.

Например, закон сохранения энергии нарушается, хотя и ничтожно мало, слабой неоднородностью времени, вызванной расширением Вселенной. Нарушение симметрии придает красоте природы особую изысканность.

Красота, о которой мы говорим, — это не только отражение гармонии материального мира, но и красота логических построений. Законы логики — такой же объект познания, как и законы природы. Их

независимость от познающего субъекта доказывается всеобщностью логических заключений. Логическая красота так же объективна, как и красота физических законов. Мы ощущаем изящество теории и в том случае, когда ее предсказания противоречат экспериментальным фактам.

Красота логических построений в наиболее чистом виде проявляется в математике. Так, математика изучает все возможные геометрии

пространства с произвольным числом измерений. Математическая ценность и красота результатов не зависят от того, какая именно из геометрий осуществляется в нашем трехмерном мире.

Один из примеров математической красоты — “алгебра высказываний” или “алгебра логики”, позволившая анализировать законы и возможности логических заключений. Эта теория оказалась крайне важной для построения ЭВМ

и для выяснения возможностей
искусственного интеллекта.

Иного рода красота физики. В
математике правильность
интуитивных догадок проверяется
логически. Физика же изучает мир
вещей; верховный судья здесь —
эксперимент. Не обязательно всегда
ставить его для проверки теории.
Чаще всего теория опровергается или
подтверждается при анализе
сделанных ранее экспериментов или
вытекающих из них соотношений.

Теоретические построения в физике требуют согласования с тем, что уже твердо вошло в наши знания об окружающем мире. Существует расхожее мнение, что революционное научное открытие переворачивает науку, отменяя все прежние результаты. К счастью, в науке таких революций не бывает. Так, даже ошеломляющие идеи теории относительности и квантовой теории, совершившие переворот в методах физического познания, не отменили механики Ньютона, а лишь

указали границы ее применимости. В науке, как и в искусстве, новое не отменяет красоты старого. Романтика и красота науки во взаимопроникновении и переплетении старых и новых идей.

Красота физики открывается со всей полнотой только с помощью математики.

Теория относительности возникла из глубочайшего

пересмотра понятий времени и пространства. Математики почти не потребовалось. Но завершённую красоту теория приобретает, если воспринимать ее как следствие симметрии природы относительно поворотов в четырехмерном пространстве, где четвертая координата — время. Уравнения теории тяготения, несмотря на глубину и ясность идей, лежащих в ее основе, нельзя даже представить себе без методов описания величин в пространстве, геометрические

свойства которого изменяются от точки к точке.

Д. И. Менделеев обнаружил удивительную периодичность химических свойств, но подлинную красоту таблица Менделеева обрела после создания квантовой механики, когда полностью раскрылась природа этой симметрии.

Природа почему-то скрывает часть красоты от самого

пристального взгляда физиков и позволяет увидеть ее только с помощью сложнейших математических построений.

Бор сказал о теории элементарных частиц Гейзенберга: “Эта теория недостаточно безумна, чтобы быть правильной”. Эту фразу часто цитируют и она приносит немало вреда дилетантам, принимающим нелепость теории за достаточное условие ее ценности. Возможно, словами “недостаточно

безумна” Бор хотел сказать, что теория Гейзенберга не предлагает новых подходов к описанию природы. Однако после создания теория относительности, теории тяготения и квантовой механики колоссальные успехи как в физике конденсированных сред, так и в теории элементарных частиц были достигнуты без изменения методов описания природы. Точнее было бы сказать, что эта теория не может быть правильной, таи как она недостаточно красива.

Поиски красоты, т. е. единства и симметрии законов природы — характерная черта физики XX в. и особенно последних десятилетий. К этому направлению развития физики мы еще вернемся.

Математика как инструмент познания

Все естественные науки нуждаются в математике. Однако везде, за исключением физики,

математика используется только как вспомогательный инструмент. Так, в биологии формализуется лишь та сторона явлений, которая сводится к физическим процессам, главное же — процессы жизни — определяется скорее качественными характеристиками и пока не требует изощренной математики. Роль математики в физической науке гораздо глубже. Дело не только в том, что физика не может обойтись без математического языка и математического аппарата, и даже не

В том, что математика позволяет вычеркнуть из списка трудностей вывод однозначных следствий из уравнений, описывающих законы природы. Самое важное, что математика позволяет сформулировать интуитивные идеи и гипотезы в форме, допускающей количественную проверку. Не обсчет эффектов, а возможность проверки гипотез, лежащих в основе законов, составляет главную ценность математики как инструмента познания физического мира.

Результативность интуитивных методов физики, недопустимых с точки зрения математики, связана с тем, что экзотические ситуации, которые математик обязан предусмотреть, создавая строгое доказательство, не встречаются в реальном мире. Бесконечности и разрывы в физических функциях есть результат сознательно идеализированной или неудачной формулировки. Те же величины в более совершенной теории

оказываются конечными и непрерывными при вещественных значениях переменных.

Физика немыслима без математики и математических понятий, но не сводится к ним. Более того, главное в физике — не формулы, а их интерпретация, понимание, именно оно питает интуицию. Физика развивается с помощью не математической логики, а физической интуиции.

Эти утверждения трудно
принять физику математического
происхождения, который
рассматривает теоретическую
физику как раздел прикладной
математики. Он удивляется: “Почему
вы приписываете главную заслугу в
создании теории относительности
Эйнштейну, тогда как
преобразования Лоренца были
получены раньше?” Или: “Почему вы
приписываете главную роль в
понимании квантовой механики
Бору, тогда как основное уравнение

этой теории получил Шредингер (или в матричной форме — Гейзенберг)?”

Для математика естественно стремление сформулировать аксиомы, установить их непротиворечивость и затем извлечь все логические заключения, которые следуют из них.

Стремление к аксиоматизации в физике (“6-я проблема Гильберта”)

неплодотворно и противоречит духу опытной науки. Когда появляется возможность аксиоматизировать какой-либо раздел физики, как, например, термодинамику, он уходит из области развивающейся физической науки и делается объектом прикладной математики. Главная задача физики — не извлекать следствие из принятых аксиом, а найти аксиомы; извлечение следствий несравненно проще. Физическая теория — не логическое следствие из принятых аксиом, а

здание, построенное на правдоподобных предположениях, которые предстоит проверить.

В физике наибольший интерес представляют задачи, которые математик назвал бы “некорректными”, когда исходных данных не хватает для того, чтобы найти решение. Искусство состоит в том, чтобы угадать, какие недостающие соотношения реализуются в природе. Задача физики — сконструировать по

возможности точную модель мира без строгих правил игры, используя все известные экспериментальные и теоретические факты, строя интуитивные догадки, которые в дальнейшем будут проверены на опыте.

Почему математика оказывается таким точным и незаменимым инструментом, вскрывающим красоту опытных наук? Не означает ли это, что она изучает не мир логических построений сам по себе,

а через него все возможные реализации мира вещей; не нашу единственную Вселенную и не только те законы, которые ею управляют, а все возможные законы, которые могли бы реализоваться при других начальных условиях или в других вселенных?..

Несомненно, роль математики в других естественных науках будет возрастать по мере их развития. Кроме того, в будущем в математике возникнут новые структуры, которые

откроют новые возможности
формализовать не только
естественные науки, но в какой-то
мере и искусство.

Принцип наблюдаемости

Важную роль в становлении
физики XX в. сыграл принцип
наблюдаемости: в науку должны
вводиться только те утверждения,
которые можно хотя бы мысленно,
хотя бы в принципе проверить на

опыте. впервые в физике XX в. принцип наблюдаемости был использован при создании теории относительности. Требование наблюдаемости заставило Эйнштейна ввести определение одновременности, проверяемое на опыте. В сущности, все следствия специальной теории относительности вытекают из этого определения. Принципом наблюдаемости и принципом соответствия, согласно которому любая теория должна переходить в

предыдущую, менее общую теорию в тех условиях, в каких эта предыдущая была установлена, физики руководствовались при создании квантовой механики. Соотношение неопределенностей, т. е. взаимная неопределенность понятий координаты и скорости, есть результат ограниченной наблюдаемости этих величин.

Однако развитие теоретической физики, особенно во второй половине XX в., показало, что

требование наблюдаемости не должно применяться слишком жестко.

Так, в квантовой механике замкнутые уравнения существуют не для наблюдаемых величин, а для волновой функции, через которую наблюдаемые выражаются квадратично.

Уже в классических теориях поля в электродинамике и теории

гравитации уравнения удобнее и проще формулировать не в терминах наблюдаемых физических полей, а для вспомогательных полей (векторного потенциала в электродинамике или метрического тензора в теории тяготения). Эти поля допускают целый класс преобразований (калибровочные преобразования), не изменяющих наблюдаемые величины. При квантовании введение таких калибровочных полей делается принципиально необходимым.

Поучительна история так называемой S - матрицы или матрицы рассеяния, предложенной Гейзенбергом в 1943 г. Это способ записать в компактной форме все результаты возможных экспериментов по изучению системы. Введение S - матрицы позволило получить много важных соотношений. Успех этого метода привел в 50-х гг. к идее получить замкнутые уравнения для матрицы рассеяния, связывающие между

собой все возможные амплитуды рассеяния, и таким образом построить теорию элементарных частиц, не обращаясь к их внутреннему устройству, связывая непосредственно данные эксперимента. Но S -матрица имеет дело только с поведением частиц, разведенных на большие расстояния, где они изолированы друг от друга. Поэтому в ней теряются такие частицы, как кварки, не существующие в изолированном виде. Не исследуя механизм

взаимодействия элементарных
частиц и полей на малых
расстояниях, невозможно построить
разумную теорию. Требование
буквальной наблюдаемости
оказалось слишком стеснительным
для современной физики.

Дополнительность

В период мучительных споров,
вызванных противоречием между
вероятностным характером

предсказании квантовой теории и однозначной причинностью классической физики, Нильс Бор ввел принцип дополнительности, согласно которому некоторые понятия несовместимы и должны восприниматься только как дополняющие друг друга. Соотношение неопределенностей представляет собой количественное выражение этого принципа, применимого во многих областях. Идея дополнительности позволяет понять и примирить такие

противоположности, как физическая закономерность и целенаправленное развитие живых объектов. Ниже мы обсудим этот принцип более подробно.

Теория познания Эйнштейна не допускала вероятностного описания действительности. Для Бора же идея дополнительности сделала вероятностную интерпретацию не только естественной, но и необходимой.

Принцип причинности

Один из важнейших принципов, ограничивающих поиски новых теорий — принцип причинности. Физики под этим понимают тезис, согласно которому причина должна предшествовать следствию. Такое требование на первый взгляд кажется очевидным, вытекающим из определения понятий причины и следствия. Однако содержательность принципа причинности состоит именно в том, что он может не

выполняться и допускает экспериментальную проверку. Согласно принципу наблюдаемости нужно прежде всего определить причинность в форме, позволяющей проверку, подобно тому как это сделал Эйнштейн с понятием одновременности.

Пусть B есть следствие A . Допустим, что причина A отличалась от нуля в течение очень малого интервала времени вблизи момента t . Если причинность

соблюдается, то следствие B будет
отлично от нуля только в моменты t ,
более поздние, чем t . В принципе
это запаздывание можно измерить.
Если обнаружится, что B существует
при t меньших чем t , значит
причинность нарушена.

Запишем наше определение
причинности в более конкретной
форме. Скажем, A — волна,
падающая на рассеиватель, а B —
волна рассеяния. Тогда
символически $B=SA$. Назовем S

функцией рассеяния. Тот факт, что, согласно причинности, B в момент t определяется значениями A в предшествующие моменты, накладывает жесткие ограничения на свойства функции рассеяния S . Эти ограничения можно проверить на опыте.

Чтобы сохранить причинность при поисках новых уравнений, ставится требование локальности взаимодействий. Это означает, что взаимодействие, скажем, частицы с

полем определяется значением поля в той точке пространства и времени, в которой находится частица. В случае двух полей взаимодействие определяется их значениями в одной и той же точке пространства-времени.

Взаимодействие между двумя полями в разных точках передается с помощью того же или другого поля со скоростью, согласно теории относительности, не превышающей скорости света. Этим обеспечивается

причинность: следствие сдвинуто по сравнению с причиной на время распространения взаимодействия. Так, взаимодействие между двумя движущимися электронами осуществляется через посредство электромагнитного поля, локально взаимодействующего с каждым из электронов.

Локальность уравнений есть количественное выражение идеи близко-действия, принятой в физике еще в прошлом веке.

Требование локальности
ограничивает поиски уравнений и
делает их более красивыми.

Во всех сделанных до сих пор
экспериментах причинность
соблюдалась. Однако для сверхмалых
масштабов, на которых, как мы
увидим, происходят значительные
флуктуации геометрии
пространства-времени, понятия “до”
и “после” делаются

неопределенными и смысл причинности может измениться.

Теория относительности и теория тяготения

История создания специальной теории относительности (СТО) — один из лучших примеров того, как конкретная философия дает толчок науке. Идея о том, что в науке не должно быть понятий, которые нельзя сформулировать на языке

реального или мысленного
эксперимента — принцип
наблюдаемости,— заставила
Эйнштейна подвергнуть сомнению
интуитивное понятие
одновременности и ввести
определение, проверяемое на опыте.
Из этого определения немедленно
следуют все результаты специальной
теории относительности — и
Лоренцово сокращение, и
замедление процессов в движущейся
системе координат, если наблюдать
за ними из неподвижной.

Относительность одновременности

В популярной статье 1898 г. “Измерение времени” Анри Пуанкаре высказал замечательную мысль об условности определения одновременности. Обсуждалась только одновременность событий в двух удаленных точках неподвижной системы координат. Пуанкаре заключает: “Одновременность двух событий или порядок их следования,

равенство двух длительностей должны определяться таким образом, чтобы формулировка законов природы была настолько простой, насколько это возможно. Другими словами, все эти правила, все эти определения являются лишь плодом неосознанного соглашения”.

Для двух точек неподвижной системы координат выбора нет; единственное приемлемое для физика “соглашение” — устанавливать одновременность двух

событий с помощью световых сигналов, используя проверенное на опыте постоянство скорости света в пустоте. По Эйнштейну, в любой инерциальной системе координат вспышки света в разных точках считаются одновременными, если свет одновременно приходит в точку, лежащую на равном расстоянии от них. Из этого определения сразу же следует относительность одновременности: события, одновременные для неподвижного

наблюдателя, неодновременны для движущегося.

Из мысли об условности одновременности два великих человека — Пуанкаре и Эйнштейн — сделали разные выводы. Эйнштейн, установив относительность одновременности в разных инерциальных системах, заключает, исходя из принципа наблюдаемости, что время течет по-разному для неподвижного и движущегося объекта. Пуанкаре же принял

ньютонову концепцию абсолютного времени и пространства. Он придерживался конвенционалистской философии, согласно которой в основе математических и естественнонаучных теорий лежат произвольные соглашения. Пуанкаре считал утверждения Эйнштейна условными и не принял теорию относительности.

Лоренц, Пуанкаре и СТО

Теория, выдвинутая Лоренцом и развитая Пуанкаре, отличается от той, которую мы называем теорией относительности. У Лоренца и у Пуанкаре, в отличие от Эйнштейна, лоренцово сжатие получается не как неизбежное следствие кинематики, а как результат изменения баланса сил между молекулами твердого тела при движении.

В 1909 г. в Геттингене Пуанкаре прочел лекцию “Новая механика”, где перечислил

постулаты, принятые в его теории: 1) независимость физических законов от выбранной инерциальной системы; 2) скорость материального тела не должна превышать скорости света; и, наконец, 3) тела сжимаются вдоль движения. Об этом третьем постулате Пуанкаре говорил: “Необходимо принять гораздо более странную гипотезу, противоречащую всему, к чему мы привыкли: тело при движении испытывает деформацию в направлении движения... как ни странно, приходится признавать, что

эта третья гипотеза превосходно подтверждена...” Из этих слов видно, что, с позиции Лоренца — Пуанкаре, сокращение Лоренца выглядит удивительным событием, которое почему-то должно выполняться для всех видов сил. Между тем у Эйнштейна оно является прямым следствием его двух постулатов: требования неизменности законов природы при изменении инерциальной системы и постоянства скорости света.

Идея произвольных соглашений неприменима в опытных науках. Системы координат Птолемея и Коперника логически равноправны, но без “соглашения” Коперника не были бы найдены законы Кеплера и закон тяготения. Можно построить новую механику и на “соглашении” Лоренца — Пуанкаре. Но именно из-за третьего постулата она была бы несравненно сложнее теории относительности. Так, в этой теории, например, приходится выяснять вид

сил, обеспечивающих равновесие
электрона, вводить “давление
Пуанкаре”.

Очевидно, что без перехода к
гелиоцентрической системе не было
бы небесной механики, так же как
без “соглашения” Эйнштейна не
было бы ни теории тяготения, ни
современных теорий поля.

Из всех возможных соглашений
только одно приводит к новому

качеству. Это и доказывает неприемлемость конвенционализма.

Лоренц и Пуанкаре внесли глубочайший вклад в теорию относительности, но не сделали того переворота, который совершил Эйнштейн. После работы Пуанкаре 1898 г. и работы Лоренца 1904 г. оставалось сделать еще одно решительное усилие — принять относительность пространства-времени, но этот шаг требовал другого типа мышления, другой

философии. Лоренцу помешала его глубокая приверженность философии физики прошлого века. Могучая математическая интуиция Пуанкаре оказалась непригодной для этой задачи — здесь требовалась интуиция физическая. Его математическое прошлое, возможно, и породило слишком гибкую конвенционалистскую теорию познания, несовместимую с философией физики.

В статье “Анри Пуанкаре и физические теории” Луи де Бройль говорил: “Молодой Альберт Эйнштейн, которому в то время исполнилось лишь 25 лет и математические знания которого не могли идти в сравнение с глубокими познаниями гениального французского ученого, тем не менее раньше Пуанкаре нашел синтез, сразу снявший все трудности, используя и обосновав все попытки своих предшественников. Этот решающий

удар был нанесен мощным интеллектом, руководимым глубокой интуицией и пониманием природы физической реальности...”

Теория тяготения и современная физика

Общая теория относительности или теория тяготения представляет собой обобщение специальной на неинерциальные системы. На современную теоретическую физику

теория тяготения оказала влияние не только сама по себе. Главную роль сыграли те общие идеи, которые Эйнштейн использовал при ее создании. Это, прежде всего, идея о том, что нужно искать уравнения для поля тяготения. Было несколько попыток (одна из них принадлежала Пуанкаре) объяснить поправки к небесной механике, рассматривая звезды как систему тяготеющих центров с запаздывающим взаимодействием, т. е. с учетом конечной скорости распространения

взаимодействия. Эйнштейн сразу же отказался от этого направления и ввел полевые переменные.

Трудно представить себе более поучительное занятие для молодого физика-теоретика, чем изучение десятилетней истории создания теории тяготения. Эйнштейна поразила колоссальная точность, с которой соблюдается принцип эквивалентности,— пропорциональность весовой и инертной масс для любого тела,

независимо от его устройства. Он начал, как и полагается физику, с простейших следствий, вытекающих из принципа эквивалентности сил гравитации и “сил инерции” для равноускоренного и вращательного движений.

Универсальность принципа эквивалентности убедила Эйнштейна в необходимости той удивительной связи геометрии с гравитацией, которая следует из его теории тяготения. С помощью своего университетского сокурсника Гросмана он понял, что для

обобщения его идей на случай произвольных систем координат нужно использовать Риманову геометрию, затем овладел соответствующей техникой и поставил задачу нахождения общековариантных уравнений, связывающих четырехмерную геометрию с плотностью материи.

Уравнения Эйнштейна обладают свойством калибровочной инвариантности. Это означает, что существует широкий класс

преобразований метрического тензора, не изменяющих физические свойства гравитационного поля, подобно тому как остаются неизменными электрические и магнитные поля при определенных преобразованиях описывающего их векторного потенциала.

Калибровочная инвариантность — характерная черта всех современных теорий поля. К сожалению, без формул лучше пояснить это невозможно.

Еще одна особенность современных теорий поля, использованная при создании уравнений тяготения,— требование симметрии. Уравнения тяготения получаются, как уже упоминалось, из требования ковариантности (одинаковой вариантности) всех слагаемых уравнения при произвольных локальных преобразованиях координат.

Таким образом, общие идеи теории тяготения, включая и неосуществленные попытки создать теорию поля, объединяющую гравитацию и электродинамику, повлияли на ход развития и направление поисков современной теоретической физики. Из всех существующих физических теорий теория тяготения, *возможно*, самая совершенная с эстетической и философской точек зрения. Ландау считал ее самой красивой.

Нужно ли искать альтернативу этой теории? Теория тяготения логически замкнута и однозначно описывает экспериментальные данные. Поэтому, как мне кажется, нет ни экспериментальных, ни теоретических оснований для поисков альтернативного описания. Впрочем, понятие красоты не абсолютно объективно и поэтому может появиться теория, которая авторам покажется более красивой. Но она будет вправе претендовать на

научную ценность только в том случае, если объяснит какие-либо явления, необъяснимые с точки зрения классической теории тяготения. Попытки новой интерпретации уже завершенной теории, как правило, выдвигаются теми научными работниками, которых Паули иронически называл “Grundleger und Neubegrunder”. Этот вид активности если и помогает развитию науки, то только косвенно, побуждая точнее формулировать основы уже существующей и

доказавшей свою плодотворность теории.

Квантовая теория

Философские аспекты квантовой механики не раз обсуждались на страницах этого журнала. Мне придется повторить несколько известных истин, чтобы показать их связь с конкретной философией.

Главное открытие квантовой теории — вероятностное описание микромира. Волновая функция, описывающая поведение частиц,— не физическое поле, а поле вероятности. Этим объясняются все удивительные особенности квантовой теории.

Принцип дополнительности

Прежде несколько слов о неожиданной диалектике Нильса

Бора. Бор говорил: “Каждое высказанное мною суждение надо понимать не как утверждение, а как вопрос”. Или: “Есть два вида истины — тривиальная, отрицать которую нелепо, и глубокая, для которой обратное утверждение — тоже глубокая истина”. Можно сформулировать эту мысль иначе: содержательность утверждения проверяется тем, что его можно опровергнуть. Вот еще слова Бора: “Никогда не выражайся яснее, чем ты думаешь”. На вопрос, какое понятие

дополнительно понятию истины, Бор ответил: “Ясность”.

Принцип дополнительности, о котором сейчас пойдет речь,— вершина боровской диалектики.

Слова Гегеля о единстве и борьбе противоположностей, как и всякое слишком общее суждение, от частого употребления сделались тривиальными. Боровская идея

дополнительности дает мысли
Гегеля новое воплощение.

В начале 1927 г. произошли два
важных события: Вернер Гейзенберг
получил соотношение
неопределенностей, а Нильс Бор
сформулировал принцип
дополнительности.

Анализируя все возможные
мысленные эксперименты по
измерению координаты и скорости

частицы, Гейзенберг пришел к заключению, что возможность одновременного их измерения ограничена.

Мы не даром употребляем слово “неопределенность” — не ошибка, не незнание, а именно неопределенность. Ведь принципиальная невозможность измерить означает, согласно принципу наблюдаемости, неопределенность самого понятия,

Соотношение
неопределенностей Гейзенберга есть
количественное проявление
принципа дополнительности Бора.
Вот несколько примеров
дополнительности понятий.

Частица-волна — две
дополнительные стороны единой
сущности. Квартовая механика
синтезирует эти понятия, поскольку
она позволяет предсказать исход
любого опыта, в котором

проявляются как корпускулярные, так и волновые свойства частиц.

Непрерывность и скачкообразность физических явлений — понятия дополнительные. Измерения всегда приводят к непрерывным функциям. В реальности скачки, хоть и на малом интервале, но сглажены. Так, в атомах энергетические скачки сглажены конечной шириной спектральных линий, в фазовых переходах — конечным числом

молекул образна. В этом смысле утверждение древних “природа не делает скачков” правильно. Но вместе с тем такое сглаживание не снимает скачкообразную закономерность, она остается как разумное приближение, точность которого растет по мере исключения сглаживающих явлений.

Существует вызывающая много споров проблема — как логически согласовать необратимость макроскопических явлений с

обратимостью уравнений механики, которая определяет движение отдельных частиц макроскопической системы? Как однозначные законы механики частиц согласуются с вероятностным описанием статистической физики?

Замечательный ленинградский физик-теоретик Николай Сергеевич Крылов, скончавшийся, когда ему еще не было и 30 лет, в -своей книге “Обоснование статистической физики” глубоко проанализировал

упомянутую трудность и впервые ввел понятие “перемешивания” в фазовом пространстве как необходимое условие статистического описания. Он высказал мысль о том, что существует дополнительность между статистическими характеристиками — температурой, плотностью, давлением и микроскопическим описанием частиц, входящих в систему. Крылов показал, что попытка определить координаты и скорости частиц исключает

возможность статистического описания. К несчастью, ранняя смерть не позволила ему развить эту идею.

Физическая картина явления и его строгое математическое описание дополнительные. Создание физической картины требует качественного подхода, пренебрежения деталями и уводит от математической точности. И наоборот — попытка точного математического описания настолько

усложняет картину, что затрудняет физическое понимание. В этом смысл слов Бора, утверждавшего, что ясность дополнительна истине.

Бор много сделал для применения идеи дополнительности в других областях знаний. Сводятся ли биологические закономерности к физико-химическим процессам? Все биологические процессы определяются движением частиц, составляющих живую материю. Но такой взгляд отражает только одну

сторону дела. Другая сторона, более важная — закономерности живой материи, которые хотя и определяются законами физики и химии, но не сводятся к ним. Для биологических процессов характерна финалистическая закономерность, отвечающая на вопрос “зачем”. Физика же интересуется только вопросами “почему” и “как”. Правильное понимание возможно только на основе взаимодополнительного описания биологии, единства физико-

химической причинности и биологической целенаправленности.

Согласно Бору, проблема свободы воли решается дополнительностью мыслей и чувств — пытаясь анализировать переживания, мы их изменяем, и наоборот — отдаваясь чувствам, теряем возможность анализа.

Лингвист как-то пожаловался мне, что трудно примирить два

направления, существующие в его науке. Одни утверждают, что смысл фразы целиком определяется совокупностью входящих в нее слов. Другие, в том числе мой собеседник, считают, что слова — это лишь символы, намекающие на содержание. В пример он приводил фразу: “У кого в 1978 г. была А. П. Иванова со своим пульпитом?” Ясно, что врач спрашивает, у какого специалиста лечилась раньше его пациентка. Но как сконструировать

машину для перевода, которая правильно передала бы смысл?

Я предложил моему знакомому обратиться к идеям Бора. Через некоторое время он написал мне: “Ваша мысль о принципе дополнительности применительно к двум сторонам языка хороша и пришлась к стати. Она позволяет осмыслить противоречивость этих двух сторон как благо, как свидетельство известной целостности, а не как занозу...”.

В физике идея Бора приводит к количественным соотношениям, что и доказывает ее важность. В других областях идея дополнительности на первый взгляд кажется почти тривиальной. Однако ее ценность доказывается тем, что она помогает в поисках направления развития: в приведенном примере — выработать рациональные пути построения машины для перевода.

Особенности квантовой теории

Из принципа дополнительности следуют все непривычные особенности квантовой теории. Перечислим некоторые из них.

1. Предсказания квантовой механики неоднозначны; они дают лишь вероятность того или иного результата.

Эта неоднозначность противоречит детерминированности классической физики. Успехи

небесной механики в XVII—XVI II
вв. внушили глубокую веру в
возможность однозначных
предсказаний. Пьер Лаплас говорил:
“Разум, который для какого-нибудь
данного момента знал бы все силы,
действующие в природе, и
относительное расположение ее
составных частей, если бы он, кроме
того, был достаточно обширен, чтобы
подвергнуть эти данные анализу,
обнял бы в единой формуле
движения самых” огромных тел во
Вселенной и самого легкого атома;

для него не было бы ничего неясного, и будущее, как и прошлое, было бы у него перед глазами...”. Иными словами, зная координаты и скорости всех частиц, можно предсказать будущее и узнать прошлое Вселенной. Так же детерминированы и предсказания классической электродинамики.

В квантовой механике неопределенность принципиальна, она следует из дополнительности квантовой природы микрообъектов в

классических методов описания. Определить состояние системы, задав “координаты и скорости всех частиц”, невозможно. Самое большее, что можно сделать,— задать в начальный момент волновую функцию, описывающую вероятность тех или иных значений координат и скоростей. Квантовая механика позволяет найти волновую функцию в любой более поздний момент. Причинность в лапласовом смысле нарушена, но в более точном квантово-механическом понимании

она соблюдается. Из максимально полно определенного начального состояния однозначно следует единственное конечное состояние. Изменился только смысл слова “состояние”.

2. Вероятностное описание физических явлений (статистическая (физика) до квантовой механики возникало при описании сложных систем, где малое изменение начальных условий за достаточно большое время приводит к сильному

изменению состояния. Эти системы описываются строго однозначными уравнениями классической механики, и вероятность появляется при усреднении по интервалу начальных состояний.

В противоположность этому, согласно квантовой механике, вероятное описание справедливо как для сложных, так и для самых простых систем и не требует никакого дополнительного усреднения начальных условий.

3. Причина вероятностного характера предсказаний в том, что свойства микроскопических объектов нельзя изучать, отвлекаясь от способа наблюдения. В зависимости от него электрон проявляет себя либо как волна, либо как частица, либо как нечто промежуточное. Разумеется, есть свойства, не зависящие от способа наблюдения: масса, заряд, спин частицы, барионный заряд, магнитный момент... Но всякий раз,

когда мы хотим одновременно измерить какие-либо дополнительные друг другу величины, результат будет зависеть от способа наблюдения. Это свойство квантовых объектов В. А. Фок называл “относительностью к средствам наблюдения”.

Причины этого неустранимы — мы вынуждены описывать квантовые объекты на языке классической физики, на котором говорят наши средства наблюдения и на котором

мы формулируем свои мысли. Мы неизбежно пользуемся субъективными инструментами для описания объективного, но ничего при этом не теряем. Мы как бы узнаем форму многомерного предмета, изучая его трехмерные проекции, рассекая его по разным плоскостям.

4. Волновая функция — не физическое поле, а поле информации. После каждого измерения волновая функция

изменяется скачком. В самом деле, пусть электрон имеет определенный импульс. В этом состоянии до падения на фотопластинку электрон можно было бы с одинаковой вероятностью найти в любом -месте; после почернения зерна пластинки неопределенность его положения за ничтожное время изменилась скачком — теперь она задается размером зерна.

Ясно, что никакое физическое поле не может обладать такими

свойствами. Из-за конечной скорости распространения света нельзя за короткое время изменить физическое поле в большой области пространства. Скачкообразное изменение волновой функции означает только другой тип наблюдения, другое дополнительное условие — в нашем примере мы ищем волновую функцию сначала при условии, что отобран заданный импульс электрона, а затем при условии, что почернело данное зерно. Вот близкая аналогия:

представим себе телескоп, быстро переведенный с одной звезды на другую, далекую,— произошел лишь отбор места наблюдения, не связанный ни с какими физическими воздействиями телескопа на звезды или одной звезды на другую.

5. В квантовой механике выполняется принцип суперпозиции — полная волновая функция складывается из волновых функций взаимоисключающих событий. Как мы знаем, в электродинамике

принцип суперпозиции нарушается в сильных полях. Можно представить себе такую квантовую теорию, где этот принцип в некоторых условиях перестанет точно соблюдаться и для волновой функции. Но почти невозможно представить квантовую теорию, в которой нарушались бы соотношение неопределенностей и вероятностное толкование волновой функции.

Эйнштейн и Бор

Глубокие физические идеи — всегда плод философского осмысления физики. Во всех главных своих творениях — гипотеза световых квантов, теория относительности, теория тяготения, космология — Эйнштейн выступал как философ физики.

У Бора дар философского осмысления проявился при создании физической интерпретации квантовой теории. Философские идеи Бора подготовили подсознание

физиков для таких открытий, как соотношение неопределенностей и вероятностное толкование волновой функции.

Интересно проследить, как развивались взгляды этих двух великих философов физики.

До 1925 г. Бор — будущий создатель принципа дополнительности — выступал против эйнштейновой гипотезы

световых квантов, пытаясь сохранить классическую электродинамику. Между тем открытый Эйнштейном в 1905 г. дуализм волн-частиц был первым физическим примером дополнительности. Позже, когда почти все физики приняли вероятностную интерпретацию волновой функции, Эйнштейн отнесся к этому толкованию отрицательно, хотя сам в работе 1916 г. впервые ввел вероятности переходов...

Их спор о физическом смысле квантовой механики и о справедливости соотношения неопределенностей продолжался много лет, начиная с 1927 г. Когда Эйнштейн почувствовал, что не может найти слабого места в логике квантовой механики, он заявил, что эта вполне последовательная точка зрения противоречит его физической интуиции и, по его убеждению, не может быть окончательным решением: “Господь Бог не играет в

кости...”.

В 1935 г. появилась работа Эйнштейна, Подольского и Розена “Может ли квантовомеханическое описание физической реальности считаться полным?”. Допустим, что две подсистемы некоторое время взаимодействовали, а потом разошлись на далекое расстояние. Авторы замечают: “Поскольку эти системы уже не взаимодействуют, то в результате каких бы то ни было операций на первой системе во

второй системе уже не может получиться никаких реальных изменений”. Между тем, согласно квантовой механике, с помощью измерений в первой системе можно изменить волновую функцию второй системы...

Проследим это явление на простом примере. Допустим, что мы измерили импульсы двух частиц до столкновения, и пусть после столкновения одна остается на Земле, а другая летит на Луну. Если

земной наблюдатель после столкновения получит определенное значение импульса оставшейся частицы, он по закону сохранения импульса может рассчитать импульс частицы на Луне. Следовательно, волновая функция этой частицы в результате измерения на Земле определится —она соответствует определенному импульсу.

Если понимать волновую функцию как физическое поле, то такой результат невозможен. Если же

учесть, что волновая функция — волна информации, он естествен: это обычное изменение вероятности предсказаний с появлением новой информации. Мы задаем вопрос: какова вероятность, что лунный экспериментатор найдет то или иное значение импульса своей частицы при дополнительном условии, что найден определенный импульс земной частицы? Это означает, что нужно взять весь набор многократных измерений импульса в обеих лабораториях и отобрать из

этого набора те случаи, когда на Земле получился заданный импульс. При этом условии лунные данные будут соответствовать определенному и известному импульсу согласно закону сохранения импульса. Влияние измерений в одной подсистеме на предсказания о поведении другой подсистемы нужно понимать именно в смысле отбора случаев, соответствующих определенному условию. Понятно, что при изменении условий отбора волновая функция изменяется. Это

явление есть и в классической физике, и в повседневной жизни. Вероятность предсказаний скачком изменяется при изменении условий отбора событий.

В сущности, спор Бора с Эйнштейном был спором двух философий, двух теорий познания — ясного взгляда старой физики, возвращенного на классической механике и электродинамике с их однозначной детерминированностью, и более

гибкой философии, вобравшей в себя новые факты квантовой физики XX в. и вооруженной принципом дополнительности.

Нужно ли искать другую интерпретацию?

Квантовая механика вместе с теорией измерений представляет собой непротиворечивую и необыкновенно красивую теорию. Все попытки ее “усовершенствовать”

пока оказывались
несостоятельными.

В результате бурных споров о полноте квантовомеханического описания возникла идея: не объясняется ли неопределенность в поведении электрона тем, что его состояние зависит не только от импульса, координаты и проекции спина, но еще от каких-то внутренних скрытых параметров? Тогда неопределенность результата, как и в статистической физике,

возникнет из-за неопределенности этих параметров. В принципе, если бы стали известны значения скрытых параметров, предсказания сделались бы определенными, как в классической механике. При единичном предсказании подбором скрытых параметров удастся получить те же результаты, что и в квантовой механике. Однако при предсказании последовательных событий это не всегда возможно. Первое измерение так ограничивает область значений скрытых

параметров, что их свободы ко
второму измерению уже
недостаточно для согласия с
квантовой механикой.

В 1965 г. Д. Белл показал, при
каких экспериментах можно увидеть
различие между предсказаниями
квантовой механики и теории
скрытых параметров. Такой опыт был
выполнен в 1972 г. С. Фридманом и
Д. Клаузером. Они наблюдали свет,
испускаемый возбужденными
атомами кальция. В условиях их

эксперимента атом кальция испускал последовательно два кванта видимого света, которые можно было отличить с помощью обычных цветовых фильтров. Каждый квант попадал в свой счетчик, проходя через поляриметр, который отбирал определенное направление поляризации. Изучалось число совпадений как функция угла между направлением поляризации двух квантов. Теория скрытых переменных предсказывала провалы на кривой, изображающей эту

зависимость. На опыте не только не оказалось никаких провалов, но вся экспериментальная кривая в точности совпала с теоретической кривой, полученной из квантовой механики. Позже были поставлены другие, более точные опыты, которые тоже согласовались с квантовой механикой.

Итак, теория скрытых параметров, по крайней мере в ее теперешнем виде, противоречит опыту. Квантовая механика лишняя

раз подтвердилась. Но утверждение о незыблемости квантовой механики, особенно когда речь идет о неизведанной области сверхмалых масштабов, противоречило бы духу философии квантовой физики.

Квантование полей

Применение квантовой механики к электромагнитному полю и другим полям, т. е. к системам с бесконечным числом степеней

свободы, не потребовало каких-либо изменений в методах описания природы, установленных теорией относительности и квантовой механикой. Для того чтобы применить квантовую механику, разработанную для систем с конечным числом степеней свободы к полю, т. е. к системе с континуальным числом степеней свободы, рассматривались все возможные колебания в ящике достаточно большого, но конечного объема. Тогда множество степеней

свободы — счетное (их можно пронумеровать) — это степени свободы всех возможных стоячих волн в ящике. Квантовая механика применяется к каждому отдельному колебанию. Оказалось, что в пустом пространстве, когда в нем нет никаких реальных частиц, происходят колебания всех возможных полей, рождаются и исчезают частицы и античастицы.

Конец 20-х гг., когда начала создаваться квантовая

электродинамика, можно считать началом исследования главного объекта современной фундаментальной физики — вакуума.

Квантовая электродинамика

Электромагнитные волны не взаимодействуют сами с собой; каждая отдельная стоячая волна есть периодически колеблющаяся система — осциллятор. Поэтому задача

квантования электромагнитного поля сводится к задаче квантования независимых осцилляторов.

Вспомним, к чему приводит применение квантовой механики. Подобно тому как результат математических операций зависит не от истолкования символов, а только от законов их комбинаций, квантование любой системы, что бы она собой ни представляла, определяется только характером зависимости ее энергии от

обобщенных “координат” и “скоростей”. Согласно квантовой механике, энергия любого осциллятора, будь то маятник или электрической колебательный контур, может принимать только дискретные значения. Кроме того, он колеблется даже в состоянии минимальной энергии (“нулевые колебания”) — его кинетическая, потенциальная и, разумеется, полная энергия, равная их сумме, не равны нулю.

Вернемся к электромагнитному полю. В состоянии с наименьшей энергией всего электромагнитного поля — вакууме — все осцилляторы поля находятся в основном (низшем по энергии) состоянии. Но при этом, согласно квантовой механике, энергия электромагнитных осцилляторов отлична от нуля. В вакууме происходят нулевые колебания электромагнитного поля.

Когда какой-нибудь из осцилляторов переходит в первое возбужденное состояние, говорят, что в вакууме появился один фотон — квант энергии электромагнитного поля. Слова “летит поток из N фотонов с заданным волновым вектором” означают, что распространяется электромагнитная волна с тем же волновым вектором, возбужденная до N -то уровня энергии. Так разрешилась проблема волн-частиц. Частица — фотон —

представляет собой возбуждение соответствующей волны. Когда ставится эксперимент по интерференции, проявляются волновые свойства поля. Когда же изучают рассеяние света, скажем, на атоме, и проверяют энергию и импульс отдачи электрона, проявляются корпускулярные свойства, связанные с дискретностью возможных значений энергии заданной волны.

Идея рассматривать частицы как возбужденные состояния некоторого поля относится не только к электромагнитному, но и ко всем другим квантовым полям, имеющимся в природе.

Взаимодействие между частицами обычно осуществляется за счет обмена возбуждениями какого-либо поля, но не исчерпывается этим. Кулоновское взаимодействие между двумя электронами,

например, нельзя изобразить в виде обмена фотонами. Понятие поля оказалось шире понятия частицы.

Но вот повод снова поговорить о красоте. Если ввести нефизические фиктивные “продольные” и “скалярные” фотоны, можно записать взаимодействие между заряженными частицами в математически красивой симметричной форме, описывающей единым образом и кулоновское взаимодействие, и взаимодействие за

счет обмена физическими фотонами. За это приходится расплачиваться, приписывая фиктивным фотонам физически бессмысленную “отрицательную вероятность”. Это не страшно, так как в физических явлениях фиктивные фотоны не проявляются: воздействия скалярных и продольных квантов, в силу калибровочной инвариантности, в точности сокращаются.

Квантование гравитации и свойства вакуума

Квантовая механика аналогично применяется и к другим полям, если они достаточно слабо взаимодействуют друг с другом. Все трудности квантовой теории поля, о которых дальше пойдет речь, возникают при учете взаимодействия.

Задачу о квантовании невзаимодействующих гравитационных полей решил в 1936 г. замечательный ленинградский

физик М. П. Бронштейн, который в 1937 г. в возрасте 32 лет был приговорен к “десяти годам без права переписки”, то есть к расстрелу.

Так как, согласно Эйнштейну, гравитационное поле определяет геометрические свойства пространства-времени, квантовые колебания этого поля означают флуктуации геометрических свойств. Отношение длины окружности к радиусу колеблется около значения 2π . Теория позволяет оценить

масштаб, на котором флуктуации геометрии делаются большими. Этот масштаб носит название “планковской длины”. Он неслыханно мал: $\sim 10^{-33}$ см.

Несравненно более трудная задача — квантование гравитации на любых масштабах, когда самодействие не мало,— до сих пор не решена. О попытках ее решения мы еще поговорим.

Возбуждения
электромагнитного поля — фотоны
— можно рассматривать как частицы
со спином 1 (спин — угловой
момент в единицах постоянной
Планка), а возбуждения
гравитационного — гравитоны —
имеют спин 2. Поля, возбуждения
которых имеют целочисленные
спины, называются бозонными.
Помимо бозонных, существуют
фермионные поля, возбуждения
которых — фермионы — имеют

спин, равный полуцелому числу. К ним относятся электроны и позитроны, или нуклоны и антинуклоны, имеющие спин $1/2$.

Подобно вакуумным флуктуациям бозонных полей, происходят вакуумные флуктуации полей фермионных. В вакууме непрерывно рождаются и исчезают электроны и позитроны, протоны и антипротоны и вообще все существующие в природе частицы и античастицы. Вакуум кишит

неродившимися виртуальными
частицами.

Вакуум представляет собой удивительно сложную и интересную среду. Ее можно было бы, как и прежде, называть эфиром, но это вызвало бы путаницу с наивным и противоречивым понятием прошлого века. Физики предпочитают слово “вакуум”. Вакуум — не арена событий, а физический объект.

Бесконечности, духи, тахионы

Однако не все благополучно в Датском королевстве. Уже в электродинамике попытки вычислить поправки к физическим эффектам за счет взаимодействия электронов с нулевыми колебаниями электромагнитного поля приводят к бесконечностям. Бесконечной, например, получалась при лобовом вычислении “поправка” к магнитному моменту свободного

электрона. Бесконечности возникают при учете взаимодействия с бесконечным множеством вакуумных виртуальных фотонов и электрон-позитронных пар в непосредственной близости от электрона. Но физики научились так располагать вычисления, что бесконечности, получающиеся в расчетах, в некоторых случаях удается собрать в замкнутые выражения и в конечном счете сократить. В таких случаях теория называется перенормируемой. Чтобы

добиться этого, необходимо на всех этапах вычислений иметь только релятивистски и калибровочно инвариантные выражения.

Для этой цели Р. Фейнман разработал замечательный метод расчета — метод графиков или диаграмм,— который превратился в новую форму мышления физиков. Каждый процесс изображается рисунком. Скажем, распространение электрона — сплошной линией, распространение электромагнитной

волны — пунктирной, их взаимодействие — точкой. Любой сложный процесс составляется из подобных простых элементов. Каждый элементарный график соответствует некой математической операции, и, считывая элементы, можно расшифровать любую сложную диаграмму, т. е. написать математическую формулу, позволяющую рассчитать эффект. Физики обычно начинают обсуждение, рисуя соответствующие графики.

Этот метод позволил устранить бесконечности в квантовой электродинамике — она оказалась перенормируемой. Физические величины в этой теории рассчитаны с умопомрачительной точностью. Вот полученное из теории значение магнитного момента электрона (если магнитный момент свободного электрона принять за единицу):

$$1,0011596522 \quad (1).$$

Экспериментальное же значение этой величины равно

1,001159652(46) (цифры и скобках определены неточно). Это все равно, что измерить расстояние от Земли до Луны с ошибкой в полтора сантиметра.

Как ни замечательны успехи квантовой электродинамики, но появление бесконечностей, даже если от них удастся избавиться, означает незамкнутость теории. По существу, было сделано неявное предположение, что есть пока неизвестная теория, позволяющая

рассматривать и малые масштабы. В такой теории не пришлось бы скрупулезно следить за инвариантностью промежуточных вычислений, поскольку все выражения была бы конечны. Перенормируемость означает, что малые масштабы вносят не бесконечный, а конечный вклад. Поэтому в теорию входят конечные, но невычисляемые параметры, как, например, заряд и масса электрона в электродинамике. Когда будет построена более общая теория,

включающая малые масштабы, эти параметры определятся, т. е. выразятся через характеристики более общей теории.

Успехи квантовой электродинамики поставили задачу квантования других полей, существующих в природе. Это, помимо электродинамики. поле тяготения, поля, осуществляющие “слабое” взаимодействие, ответственное за радиоактивный распад, и поля, обеспечивающие

“сильное” взаимодействие нуклонов и мезонов.

В квантовой теории гравитации учет взаимодействия сразу *же* показывает, что такая теория неперенормируема — бесконечности неустранимы. Их удастся устранить, только предположив, что помимо упомянутых симметрий существует еще одна, связывающая фермионные и бозонные поля в единое целое. Такой симметрии нет в наблюдаемом мире — свойства известных

бозонных и фермионных полей совершенно различны. Для устранения бесконечностей достаточно предположить, что такая “суперсимметрия” существует только изначально, на сверхмалых масштабах. На больших масштабах взаимодействие полей ее разрушает (“спонтанное нарушение симметрии”).

Первоначально идея суперсимметрии связывалась с надеждой объяснить малое значение

космологической постоянной. Дело в том, что в современных уравнениях тяготения предполагается, что плотность энергии вакуума равна нулю. Если бы она не равнялась нулю, в этих уравнениях появилось бы дополнительное слагаемое — “космологический член”—с коэффициентом, который называется космологической постоянной. Анализ распределения масс во Вселенной показал, что космологическая постоянная либо равна нулю, либо неизмеримо мала,

и следовательно, мала также и плотность энергии вакуума. Между тем в вакууме происходят нулевые колебания всех возможных полей. Энергия этих колебаний не только не мала, но обращается в бесконечность. Вакуумная энергия бозонных полей положительна и бесконечна, энергия фермионных полей отрицательна и тоже бесконечна. Если фермионные и бозонные поля входят в явления природы симметрично (суперсимметрия), появляется

надежда, что положительная вакуумная энергия всех бозонных полей скомпенсируется отрицательной энергией всех фермионных полей. Однако с помощью суперсимметрии удастся скомпенсировать только ту часть нулевой энергии, которая соответствует масштабам порядка длины Планка ($\sim 10^{-33}$ см). На больших масштабах происходит спонтанное нарушение суперсимметрии. Таким образом, в оценках космологической

постоянной надежды на суперсимметрию не оправдались. Но, как и всякая красивая идея, суперсимметрия сыграла свою роль.

Как мы уже говорили, чтобы записать взаимодействие между электронами симметричным образом, приходится вводить нереальные частицы — продольные и скалярные фотоны,— которые в силу калибровочной инвариантности не входят в физические явления. Частицы такого типа называются

“духами”. Таким образом, появилось ограничение при построении новых теорий — теории должны быть перенормируемыми и калибровочно инвариантными, тогда “духи” если и возникают, то не влияют на физические явления.

Еще одна неприятность, с которой столкнулись физики при попытках построить полевые теории, — так называемые тахионы. Это возбуждения, распространяющиеся со скоростью, большей скорости

света. Как можно заключить из требования причинности, появление тахионов означает только, что состояние, которое мы считали вакуумом, т. е. имеющим самую низкую энергию, на самом деле не основное; оно неустойчиво, в нем с экспоненциальной скоростью должны происходить изменения, которые приведут к переходу в основное состояние. Чтобы избавиться от тахионов, нужно исправить теорию — найти

правильное основное состояние
системы.

Анализируя опыт всех попыток
квантования полей, физики
установили необходимые условия,
которым должна удовлетворять
непротиворечивая теория. Это 1)
локальная релятивистская
инвариантность; 2) калибровочная
инвариантность; и 3) локальность
(причинность).

Перечислив трудности полевых теорий, перейдем к попыткам построения единой теории поля, которая охватила бы все известные сегодня взаимодействия: электромагнитное, слабое, сильное и гравитационное.

Поиски единства

История естествознания — это история попыток объяснить разнородные явления общими

причинами. Так, Галилей установил законы, объединяющие все известные в то время механические явления. Ньютон в своей теории тяготения объединил законы падения тел на Земле с законами движения небесных объектов. Фарадей открыл электромагнитные явления и объединил тем самым электричество и магнетизм. Максвелл создал уравнения, охватывающие одновременно все электромагнитные явления и оптику. Эйнштейн получил уравнения, единым образом

описывающие механику больших и малых скоростей, а в теории тяготения объединил гравитацию с геометрическими свойствами пространства.

Сейчас стремление к единству стало главной тенденцией фундаментальной физики. В 1919—1920 гг., когда физики полагали, что все взаимодействия в природе сводятся только к двум — электромагнитному и гравитационному,—Эйнштейн

пытался их объединить. Эти попытки оказались преждевременными — еще не были известны слабые взаимодействия, объясняющие радиоактивный распад, и сильные взаимодействия, связывающие нуклоны (нейтроны и протоны) в атомных ядрах.

Начало объединения

Первый решительный шаг на пути к объединению всех сил

природы был сделан сравнительно недавно, когда была создана теория электрослабого взаимодействия, описывающая все электродинамические явления и все явления радиоактивных превращений.

Согласно теории электрослабого взаимодействия, существуют четыре поля, описывающие векторные безмассовые частицы. Слова “поле описывает частицы” означают, что

частицы возникают как
возбужденные состояния квантового
поля. Кроме того, приходится ввести
гипотетическое скалярное поле,
которое называют полем Хиггса.
Необходимо предположить, что поле
Хиггса обладает необычными
свойствами — оно выпадает в
“конденсат”, то есть имеет
постоянное слагаемое во всем
пространстве. Возбужденные
состояния поля Хиггса описывают
массивные скалярные бозоны, пока
не обнаруженные на опыте.

Взаимодействие четырех векторных полей с конденсатом поля Хиггса нарушает первоначальную симметрию; оно делает три поля массивными, а четвертое оставляет безмассовым. Эти новые поля описывают заряженные (W) и нейтральные (Z) бозоны с массой, приблизительно равной 100 ГэВ. Четвертое безмассовое поле — электромагнитное — описывает фотоны. При энергиях много больших, чем 100 ГэВ, различие

между полями делается
несущественным и первоначальная
симметрия восстанавливается.
Теория предсказала существование и
значение масс W - и Z -бозонов,
которые были открыты в 1983 г. в
ЦЕРНе (К. Руббиа и др.), и
установила связь между постоянной,
определяющей величину слабого
взаимодействия, и зарядом
электрона. Возникли неожиданные
связи между разнородными
явлениями. Однако, несмотря на
успехи теории, ее можно будет

считать законченной только после обнаружения поля Хиггса.

Еще большее количество гипотетических полей приходится вводить при попытке создать теорию Великого объединения, которая дала бы единое объяснение электромагнитным, слабым и сильным взаимодействиям. Такая теория должна единым образом описывать кварки, глюоны, электроны, нейтрино, мюоны, фотоны и их взаимодействие,

переводящее любую из этих частиц в другое возможное состояние.

Но сначала о схеме сильного взаимодействия. Анализ масс и взаимодействий нуклонов и мезонов привел к заключению, что они представляют собой связанные системы: нуклоны состоят из трех кварков, а мезоны — из кварка и антикварка. Кварки и антикварки скреплены друг с другом за счет взаимодействия с глюонным полем. Глюоны (возбуждения глюонного

поля) и кварки — виртуальные частицы; они не существуют в изолированном виде. Эти частицы непосредственно не наблюдаемы, но их присутствие внутри адронов (общее название для всех сильно-взаимодействующих частиц) с необходимостью следует из всей совокупности экспериментальных данных. Как мы уже говорили, требование наблюдаемости не следует понимать слишком буквально.

Приходится ввести несколько типов (несколько “ароматов”) кварков, каждый из которых может быть в одном из трех возможных “цветовых” состояний.

Кварк может виртуально испустить глюон, изменив свое цветное состояние. В теории электрослабого взаимодействия электрон может превратиться в нейтрино, испустив W - бозон. В теории же Великого объединения

должны быть еще процессы, переводящие, например, кварк в электрон или нейтрино с испусканием бозона, отличающегося от глюона, или Z-бозона. Такой -X-бозон может, кроме того, превратить два кварка, входящие в состав протона, в позитрон и антикварк. В результате протон может превратиться в позитрон и нейтральный пион.

Итак, согласно предсказаниям этой теории, протон — не строго

стабильная частица, как это предполагалось прежде; время распада протона на позитрон и нейтральный пион или на нейтрино и положительный пион составляет в первоначальном варианте теории примерно 10^{10} лет. Попытки экспериментально обнаружить распад протона показали, что время распада больше, чем 10 лет. Поэтому пришлось отказаться от первоначального варианта теории и значительно увеличить число вводимых гипотетических полей.

Другое предсказание теории — присутствие во Вселенной монополей (магнитных зарядов) — тоже пока не подтвердилось. Таким образом, теория далека от завершения.

Теория Всего

Объединение всех взаимодействий в Суперобъединение в принципе означало бы возможность объяснить все

физические явления с единой точки зрения. В этом смысле будущую теорию называют Теорией Всего. Мы используем английскую аббревиатуру ТОЕ (Theory of Everything).

До недавнего времени слова .“Теория Всего” физики произносили иронически, имея в виду дилетантов, которые пытаются объяснить сразу все явления природы. Разумеется, не следует понимать ТОЕ буквально. Суперобъединение не облегчит

понимание биологии или психологии, где физические закономерности играют не главную роль. Не поможет оно и решению задач конкретной физики, таких как природа шаровой молнии или высокотемпературная сверхпроводимость.

Многие талантливые молодые физики-теоретики, посвятившие себя этой задаче, надеются на ее скорое решение. Физики старшего поколения относятся к надеждам

создать ТОЕ в обозримое время менее оптимистично.

Хотя теория находится на очень ранней стадии и неясно даже, на правильном ли она пути, интересно проследить ход идей как пример теоретических поисков в области таких малых масштабов, где нет надежды на непосредственную экспериментальную проверку. Задача состоит в том, чтобы найти теорию, описывающую одновременно гравитацию, электродинамику,

сильные и слабые взаимодействия так, чтобы не возникали те трудности, с которыми физики столкнулись при квантовании полей (бесконечности, духи, тахионы).

При первых же попытках подойти к этой задаче выяснилось, что стандартный путь квантования полей не приводит к цели. Если при создании теории электрослабого взаимодействия и даже при попытках осуществить Великое объединение не требовалось выйти за рамки

обычной квантовой релятивистской теории полей, то для ТОЕ необходимы идеи, которые Бор назвал бы “безумными”. Одна из них — упомянутая суперсимметрия.

Вводится многокомпонентное поле, в которое симметрично входят фермионные и бозонные поля. Это означает, в частности, что число бозонных степеней свободы равняется числу фермионных. Суперсимметрия, как мы уже говорили, сразу же устраняет

бесконечность энергии вакуумных флуктуаций: бозонный вклад в энергию погашается отрицательным фермионным вкладом.

Другая “безумная” идея — введение пространства-времени с числом измерений, большим четырех. Еще в 1921 г. математик и лингвист Теодор Калуца высказал мысль о том, что наше пространство имеет пять измерений. Если в этом пространстве написать уравнения тяготения Эйнштейна, то для первых

четырех координат они совпадают с обычными уравнениями тяготения, а включение пятой координаты приводит к уравнениям Максвелла. Тем самым объединялись гравитация и электродинамика. Чтобы объяснить, почему нет движения в пятом направлении, шведский физик Оскар Клейн предположил, что оно компактифицировано, то есть замкнуто само на себя. Для пояснения можно представить себе двумерную аналогию: поверхность цилиндра. Вдоль оси цилиндра

координата не ограничена. В этом направлении частицы могут двигаться свободно, а в поперечном не выходят за пределы окружности, то есть это измерение компактифицировано. В силу квантования вращения движение вдоль компактифицированного измерения при достаточно малом радиусе цилиндра соответствует высокой энергии возбуждения и не будет проявляться на опыте. Несмотря на остроумие этих идей, они оставались в стороне от

основного пути развития физики более пятидесяти лет. Открытие слабых и сильных взаимодействий показало, что задача объединения гораздо сложнее — нужно записать единым образом не два, а четыре вида взаимодействий. Кроме того, стало ясно, что поле, объединяющее все взаимодействия, должно подчиняться квантовой механике. Поэтому надежда на простое решение исчезла и работы Калуца-Клейна потеряли привлекательность. Но “рукописи не горят”, а красивые

идеи не пропадают. В современных вариантах попыток Суперобъединения предполагается, что наше пространство-время имеет десять измерений, из которых шесть компактифицировано. Иначе заведомо не удастся построить последовательную теорию.

“Безумные” идеи

Суперсимметрия не устраняет бесконечности, связанные со

взаимодействием полей на расстояниях, стремящихся к нулю. Было много попыток ослабить взаимодействие на малых масштабах за счет отказа от локальности. Однако при этом нарушался принцип причинности. Подобные попытки не приводят к последовательной теории.

В 1970-х гг. несколько физиков — американец Джон Шварц, его сотрудник француз Жоэль Шерк и англичанин Майкл Грин выдвинули и

начали развивать идею еще более необычную, чем суперсимметрия. Предполагается “струнный” вакуум, в котором частицы возникают как возбуждения линейно протяженных объектов — струн. Это направление было подхвачено громадным числом талантливых молодых физиков, поверивших в возможность создания на этом пути ТОЕ.

При обычном подходе поля описывают динамику взаимодействующих точечных частиц

и представляют собой функции точки в пространстве-времени. При этом, как показали многочисленные попытки, в расчетах неизбежно возникают бесконечности. Чтобы сделать вклад малых масштабов конечным, рассматривается динамика взаимодействующих протяженных объектов очень малой длины — струн, возбуждения которых описывают различные частицы. Это означает, что поля уже не функции точки, а функционалы

линии, то есть зависят от положения и формы струны.

На масштабах, много больших длины струны, такое описание не отличается от обычного, но на малых взаимодействие ослабляется. Можно сказать, что струнное описание есть способ последовательно ввести нелокальное взаимодействие без нарушения причинности.

Применение квантовой механики приводит к тому, что частицы описываются не как возбуждения поля, а как возбуждения струны.

В первоначальном варианте струна содержала только бозонные возбуждения. Важным шагом было создание теории суперсимметричных струн, где наряду с бозонными имеются и фермионные степени свободы.

Бозонные возбуждения с массой покоя, равной нулю, и спином 2 интерпретируются как гравитоны — возбуждения гравитационного поля. Интересно, что для полей, содержащих много гравитонов (классическое гравитационное поле), теория, как и следовало ожидать, приводит к уравнениям тяготения Эйнштейна. Этот результат можно считать еще одним — полевым — подтверждением уравнений тяготения и одновременно

аргументом в пользу струнного подхода.

Струнный подход имеет замечательную особенность — последовательная теория возможна только для определенного числа измерений пространства, в которое вложены струны. Так, для бозонной струны бесконечности устраняются только для 26-мерного пространства (25 пространственных и 1 временная координата). Однако при этом возникают тахионы. В

суперсимметричной струне
бесконечности исчезают для 10-
мерного пространства, и тахионы
отсутствуют. Таким образом,
тахiony в бозонной струне есть
результат того, что система не
находится в основном состоянии —
должны возникнуть фермионные
флуктуации, соответствующие
суперсимметрии.

Так появилась принятая сейчас
модель физического вакуума: он
имеет 10 измерений, из которых 6

пространственных
компактифицированы, и заполнен
виртуальными струнами с длиной
порядка планковской (10^{-33} см). Все
наблюдаемые частицы, такие как
кварки, электроны, фотоны и пр.,
должны возникать как
длинноволновые возбуждения
вакуума взаимодействующих струн.

Сторонники струнных теорий
надеются, что сама
компактификация возникнет в
результате взаимодействия струн,

вложенных в первоначально
некомпактифицированное
пространство десяти измерений.

За этим кратким описанием
стоят громадный труд и
замечательные озарения. Они
потребовали величайшей
теоретической квалификации и
создания новых математических
методов исследования.

Методологически струнные теории совершенно не похожи на обычные исследования теоретической физики. Если до сих пор она развивалась опираясь на эксперимент, параллельно с развитием экспериментальной физики, то эти исследования руководствуются лишь требованием последовательности и красоты теории. Вопрос о согласовании с уже известными свойствами элементарных частиц пока не

ограничивает поиски. Только когда теория приблизится к завершению, ее разумность можно будет проверить по следствиям в области больших масштабов — она должна правильно описать все известные массы и взаимодействия наблюдаемых частиц. Пока на этом пути сделаны только первые шаги.

Конец физики?

Исчерпаем ли электрон? Может ли какая-нибудь область науки быть исчерпана?

В результате всесторонней разработки какой-либо ограниченной области науки может наступить такая стадия исследований, когда вероятность обнаружить неожиданные и важные результаты делается крайне малой. Поскольку вероятность новых результатов никогда не равна нулю,

наука неисчерпаема. Однако более существенно, что есть качественный переход. На определенной стадии исследования можно утверждать, что законы и концепции, определяющие данную область науки, твердо установлены. Это означает, что исследуемая область концептуально исчерпана. В этом смысле наука исчерпаема.

Некоторые разделы физики концептуально завершены. Мы упоминали термодинамику; можно

прибавить классическую механику малых и больших скоростей, классическую электродинамику, квантовую механику медленных частиц и даже квантовую электродинамику для не слишком малых масштабов. Это не означает, что в этих разделах физики невозможны важные открытия. Самый лучший пример — открытие высокотемпературной сверхпроводимости, хотя законы динамики электронов и атомов, определяющие свойства вещества, до

конца изучены. В перечисленных разделах физики твердо установлены законы, лежащие в основе процессов.

Несмотря на колоссальную точность вычисления, скажем, магнитного момента электрона, мы не можем сказать, что он исчерпан, — неизвестно его взаимодействие с вакуумными флуктуациями полей и с другими частицами на сверхмалых расстояниях. Но с построением ТОЕ электрон был бы концептуально исчерпан.

Можно ли построить ТОЕ в обозримое время? Вспомним, что в конце прошлого века многим физикам казалось, что физика подошла к своему завершению. Вильям Томсон (лорд Кельвин) считал, что “на небосклоне физики только два облака” — парадоксы эфира и парадокс излучения черного тела. В это *же* время Давид Гильберт выдвинул задачу аксиоматизации физики, то есть ее концептуального исчерпания. И

сразу же после подобных заявлений
начались великие научные
революции XX в.: квантование
осциллятора (1900 г.), гипотеза
световых квантов (1905), теория
относительности (1905),
квантование атома (1913), теория
тяготения (1916), новая космология
(1919—1922), квантовая механика
частиц, квантование полей (1927)...
Изменились сами методы описания
природы.

ТОЕ готовится объединить
четыре известных взаимодействия.
Но где уверенность, что на
громадном интервале
неисследованных масштабов от
характерной длины электрослабого
взаимодействия до планковской
длины не обнаружатся новые
неожиданные поля и
взаимодействия? И сохранятся ли в
этой неисследованной области
законы природы, найденные для
гораздо больших масштабов? Здесь

под законами природы мы понимаем соотношения, установленные для достаточно больших областей пространства-времени.

Не ждут ли нас такие же неожиданные перевороты представлений, какие произошли в первой половине XX в.? И, наконец, имеется ли в природе единство в той форме, которая предполагается в “безумных” идеях струнных теорий? Однако красота этих теорий заставляет верить в их

плодотворность. Если они и не приведут к ТОЕ, то несомненно обогатят физику новыми методами и концепциями.

Заключение

Сформулируем в нескольких словах наиболее существенное из написанного.

1. Анализ главных событий физики XX в. убедительно показывает

необходимость прикладной философии, философии физики. Под прикладной философией понимается качественная сторона исследований, обобщающая опыт решенных конкретных задач, опирающаяся на хорошо установленные экспериментальные факты и способы их включения в теоретическое знание. Иными словами, это осознанная и систематизированная научная интуиция.

Ни одно серьезное теоретическое исследование, как в его начале, когда необходимо найти правильное направление, так и перед завершением, когда возникает необходимость интерпретации и анализа полученных результатов, не обходилось без прикладной философии.

2. В физике последнего времени на первый план переместилось понятие красоты теории. Красота

теории имеет в физике почти определяющее значение, делает недостоверные рассуждения достаточно убедительными, чтобы поставить эксперимент для проверки предположений. Одно из главных ее проявлений — свойства симметрии законов природы. Поиски новых уравнений сводятся к установлению симметричных соотношений.

3. Физика XX в. предоставляет убедительные примеры опасности интуитивных представлений, на

первый взгляд подкреплённых
здоровым смыслом. Это, прежде всего,
представление о непрерывной
последовательности возможных
состояний механической системы,
опровергнутое Максом Планком в
1900 г.

Столь же прочно утвердилась в
сознании физиков прошлого века
ньютоновская идея абсолютного
пространства и времени. От этой
идеи пришлось отказаться после
открытия относительности

одновременности и ; создания
теории относительности.
Противоречила интуитивным
ожиданиям и связь геометрических
свойств пространства с тяготением,
установленная общей теорией
относительности.

Соотношение
неопределенностей показало
непригодность интуитивного
представления о траектории
частицы.

Причинность не только не следует из здравого смысла, как это интуитивно представляется, но может и должна быть экспериментально проверена.

4. Принцип дополнительности — хороший пример того, как преобразуются общие высказывания после обогащения их конкретным и глубоким содержанием (имеются в виду слова Гегеля о единстве и борьбе противоположностей). Дополнительность — важное

понятие философии : физики,
которое позволило создать
последовательную интерпретацию
квантовой механики и сделало
естественным вероятностное
описание законов природы.

5. Применение квантовой
механики к электромагнитному и
другим полям положило начало
исследованию свойств вакуума,
самого интересного объекта
современной физики. Изучение
вакуума с помощью экспериментов

по столкновению быстрых нуклонов и электронов привело к открытию многих частиц. Поиски симметрии, объясняющей объединение частиц в семейства с одинаковыми свойствами, привели к открытию частиц особого рода — кварков, элементарных частиц, входящих в состав адронов, но не существующих в изолированном виде.

6. Выдвинутая Эйнштейном в 20-х гг. идея единого объяснения различных сил природы через

пятьдесят лет завладела умами физиков-теоретиков.

Первый шаг на этом пути — теория электрослабого взаимодействия, которое объясняет единым образом все электромагнитные явления и все явления, связанные с радиоактивными превращениями. Можно думать, что на правильном пути, хотя и далека от завершения, теория Великого объединения,

которая объединит электрослабые и сильные взаимодействия.

Создание Суперобъединения, которое связало бы все сегодня известные взаимодействия — электромагнитное, слабое, сильное и гравитационное,— дело, по-видимому, далекого будущего, но идеи, которые выдвигаются при этих попытках, настолько красивы и интересны, что их обсуждению посвящен целый раздел о “безумных” (в боровском смысле) идеях.

Вернемся с заоблачных высот современной физики на Землю. Поскольку “критерий истины — практика”, попробуем извлечь практические выводы из написанного.

Можно ли научить молодых людей прикладной философии? Мне кажется, что нельзя, как нельзя научить мыслить. Можно лишь рассказать, как надо учиться. Разумеется, для этого лекторы

должны обладать высоким профессионализмом, иметь не только философское, но и специальное образование.

Специализация — неотъемлемый элемент профессионализма. Необходимо отделить науку от идеологии и политики и отказаться от взгляда на гуманитарные предметы как на орудия идеологической обработки молодежи. Надежда на подобный способ политического воспитания

свидетельствует

0

непрофессионализме

идеологических руководителей.

Все научные концепции должны
свободно развиваться под
воздействием новых идей и фактов,
независимо от моды и идеологии.
Иначе нарушится механизм обратной
связи, пронизывающей науку, и она
сделается догматической, то есть
бесплодной. Известно, куда завели
нашу биологию попытки
использовать науку для

подтверждения идеологических догм. Непонимание этих простых истин — одна из причин нашего духовного, социального и экономического кризиса.

Понятие обратной связи как необходимого условия устойчивости любой системы — механической, экономической, социальной — получило у нас широкое признание недавно — долгое время идеологические работники в газетных статьях называли

кибернетику “гримасой капитализма”. Сто лет назад было естественным считать анархию производства недостатком капитализма, тогда как именно она представляет собой один из механизмов обратной связи и способствует устойчивости. Хаотичность движения молекул не мешает работать газовой турбине. В наши дни необходимость обратной связи очевидна каждому профессионалу в любой области.

Это не помешало, однако, использовать в Чернобыле (и не только там) ядерные реакторы, мощность которых, вопреки требованиям обратной связи, растет при нагревании. Отсутствие автоматической устойчивости в физическом процессе вместе с непрофессионализмом операторов, нарушивших кнопочную обратную связь, обернулось национальной трагедией. Надежные атомные станции экологически лучше

тепловых, но требуют высокой культуры проектирования и эксплуатации.

Но можно ли добиться необходимой ответственности и профессионализма, пока по телевизору заговаривают воду и “заряжают” газету, пока существует понятие “номенклатурных” работников, то есть универсальных специалистов по руководству всеми областями науки, техники, культуры, пока рекомендации экономистов

отклоняют демагогическим
заявлением — “народ нас не
поймет”, а экономикой продолжают
руководить неудавшиеся идеологи?

Профессиональный руководитель
науки или экономики не обязан знать
все сам, но должен быть достаточно
компетентным, чтобы следовать
Советам хороших консультантов.
Выбирать же консультантов он
должен из тех, кого рекомендует
научное сообщество по

“гамбургскому счету”, независимо от их партийной принадлежности.

Итак, обратная связь означает необходимость пересматривать в свете новых фактов любые научные утверждения, даже принадлежащие великим и канонизированным. Применим это требование к тому, что преподают в наших вузах под названием “диалектического материализма”. На взгляд стороннего наблюдателя, само перечисление законов диалектики выглядит как

список заповедей или догм. Лучший способ оттолкнуть способного молодого человека от философии — заставить его выслушивать лектора, который преподносит как научные откровения банальные истины вроде перехода количества в качество на примере нагревания воды.

Ученые всего мира, как правило, мыслят диалектически, не называя и не формулируя “законов диалектики”, а руководствуясь здравым смыслом и научной

интуицией. Не слишком ли много стихийных диалектиков? Может быть, то, что когда-то казалось откровением, сейчас лежит на поверхности? Законы диалектики можно превратить в нетривиальные высказывания, только наполнив их конкретным содержанием. Это и должна делать прикладная философия для каждой науки в отдельности. Примеры такого применения философии приведены в предыдущих разделах.

Мне доводилось читать интересные работы по философии физики, написанные нашими историками этой науки. Но серьезных философов со специальным образованием крайне мало. Можно представить себе посредственного научного работника. Он найдет применение как исполнитель, особенно если любит свое дело. Но посредственный философ так же бесполезен, а то и вреден, как и посредственный поэт.

Нужно найти способ выращивать философски образованных историков отдельных наук. Еще лучше, если такими историками сделаются люди, всю жизнь творчески занимавшиеся данной наукой.

Нужно ли преподавать естественникам “идеологические” предметы — политэкономии, исторический и диалектический материализм и так далее? Во всяком случае, подобные лекции должны

быть факультативными, то есть без обязательного посещения и экзамена. Тогда студенты смогут оценить их качество и актуальность, “голосуя ногами”.

В заключение несколько слов об еще одной стороне философии физики — нравственной. Физика высвободила могучие и страшные силы природы, и ее часто обвиняют в бедах человечества. Но к науке, как и к природе, понятие нравственности неприменимо. Безнравственна не

наука, а люди. использующие ее
результаты во вред человеку. В наши
дни воспитание чувства
ответственности и нравственной
чистоты становится вопросом жизни
и смерти, более важным, чем сама
наука и ее приложения. Необходимо,
чтобы никакое политическое или
экономическое давление не могло
заставить людей, принимающих
решения, скажем, размещать
атомные станции вблизи больших
городов, курортов, в сейсмически

опасных зонах и экономить на мерах безопасности.

Анализ данных о больших и малых авариях на АЭС и оценка вероятности будущих катастроф могли бы дать представление о математическом ожидании потерь, включая экологические утраты и расходы на обеспечение большей надежности. Следует добавить еще труднейшие проблемы демонтажа устаревших станций и захоронения радиоактивных отходов.

Непредвзятый анализ приведет, как мне кажется, к заключению об экономической несостоятельности ядерной энергетики, особенно в наших условиях. Не преждевременно ли строить и использовать у нас ядерные реакторы? Ответ на этот вопрос должны дать специалисты, не подверженные ведомственным и иным влияниям.

Идеологическое воспитание по методу “лобового удара” — неотъемлемый атрибут

административно-командной системы — привело к потере целого пласта духовных ценностей, заключенных в мировой и особенно в русской философии начала века, философии, обращенной к человеку, философии нравственности.

Лекции по истории культуры и гуманизма помогли бы решить задачу столь же насущную, как хлеб,— привить людям веру в непреходящие нравственные ценности) без которой невозможно обновление общества.

